

Список использованных источников

1. Старцев В.А. Скрап карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах / В.А. Старцев, Г.В. Воронов, В.И. Лобанов, Э.А. Шумахер, Э.Э. Шумахер. – Екатеринбург, 2004.
2. Устройство и принцип работы дуговой сталеплавильной печи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nashkotel.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pech.html>. – Рус.
3. Братковский Е.В. Электрометаллургия стали и спецэлектрометаллургия [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по образованию / Учебное пособие. Режим доступа: http://elmet.at.ua/_ld/0/26_0285338_622B5_b.pdf – свободный. – Рус.
4. Metallurgiya [электронный ресурс] / Premium engineering. Режим доступа: <http://www.premen.ru/ru/content/air/apply/metal/> (28.03.18).
5. ГОСТ 5583–78. Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4) [Текст]. – Введ. 1980–01–01. – М.: Межгосударственный стандарт: Издательство стандартов, 2005. – 14 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Metallurgiya, 1975. – 368 с.

УДК 669.162

В. Г. Лисиенко¹, С. И. Холод^{1,2}, В. П. Жуков²

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

² Технический университет УГМК, г. В. Пышма, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ

Аннотация

Огневое рафинирование черновой меди основано на частичном удалении примесей, обладающих повышенным сродством к кислороду. Наиболее интересным является процесс централизованного рафинирования меди на одном предприятии. Это связано с тем, что черновая медь от заводов – производителей имеет различный химический состав. Очевидно, что шихта каждой загрузки также имеет переменный химический состав. Поэтому для постоянно меняющегося средневзвешенного состава жидкого металла, требуется различное количество кислорода для окисления и ошлакования примесей.

Целью работы является методика создания математической модели для решения однокритериальной и многокритериальной задачи огневого рафинирования меди. Приведены алгоритмы модели на основе пассивного эксперимента, с выбранными допущениями и ограничениями. Математические модели разработаны с использованием корреляционно – регрессионного анализа. Результирующей переменной в моделях является концентрация кислорода в расплаве. Целевая функция определяется основными переменными процесса рафинирования.

Результаты математического моделирования позволяют оперативно рассчитывать концентрацию кислорода, подаваемого в составе воздуха в расплав шихты различного химического состава, для окисления примесей. Модели согласуются с общей теорией анодной плавки, и могут использоваться для управления и прогнозирования процессом.

Ключевые слова: *огневое рафинирование, черновая медь, окисление примесей, математическая модель, линейная регрессия.*

Abstract

The refining of blister copper is based on the partial removal of impurities that have an increased affinity for oxygen. The most interesting is the process of centralized copper refining at one plant. This is due to the fact that rough copper from the producer plants has a different chemical composition. Obviously, the burden of each charge also has a variable chemical composition. Therefore, for a constantly changing average weighted composition of a liquid metal, a different amount of oxygen is required to oxidize and slag the impurities.

The aim of the work is the method of creating a mathematical model for solving the single-criterion and multicriteria task of fire refining of copper. Algorithms of the model based on the passive experiment are presented, with the chosen assumptions and limitations. Mathematical models are developed using correlation regression analysis. The resultant variable in the models is the concentration of oxygen in the melt. The objective function is determined by the main variables of the refining process.

The results of mathematical modeling allow us to quickly calculate the concentration of oxygen supplied in the air composition into the melt of a charge of different chemical composition for the oxidation of impurities. The models are consistent with the general theory of anode melting, and can be used to control and predict the process.

Key words: *fire refining, rough copper, impurity oxidation, mathematical model, linear regression*

Введение. В последнее время наблюдается тенденция стремительно меняющейся научно-технической среды, благодаря быстрому и всестороннему развитию и распространению информационных технологий, проникающих во все сферы современного общества. Это обстоятельство способствует познанию свойств изучаемых процессов и объектов на основе математического моделирования.

Методологический подход создания модели основан на классических принципах, и достаточно хорошо описан в литературе [1-8].

Структура создаваемой модели, по своему содержанию и описанию, может носить дифференцированный характер. Дифференцирование определяется несколькими уровнями сложности от репродуктивного через конструктивный до творческого. Различная степень сложности модели зависит от уровня подготовки и требований, предъявляемых к модели.

На каждом уровне для решения определенных задач составляются частные математические модели. Частная модель представляет собой логически завершённый цикл моделирования этапа технологического процесса и может быть аналитической (формулы, уравнения) или имитационной (языки программирования). При этом наибольший интерес представляют собой динамические модели, объединяющие в себе свойства эмпирических, стохастических и линейных моделей.

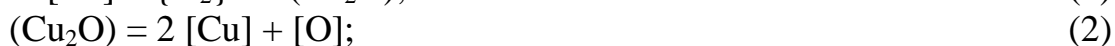
В данной работе предложена методика создания аналитических моделей на примере металлургического процесса огневого рафинирования меди.

Общие положения металлургического процесса огневого рафинирования меди. Как известно огневое рафинирование меди состоит из следующих операций: 1) загрузки шихты; 2) расплавление меди с разогревом расплава; 3) окисление примесей; 4) съема шлака; 5) раскисление (восстановление) меди; 6) разлив меди. Основными из них, определяющими процесс рафинирования, являются [9-13]:

– окисление примесей – основано на различиях в сродстве к кислороду меди и ее примесей, которое можно выразить величинами энергии Гиббса. В ряду элементов, входящих в состав черновой меди, сродство к кислороду убывает в направлении от *Al* к *Au*.

Стадия окисления начинается с продувания расплава меди воздухом.

Вследствие высокой концентрации меди в расплаве, она окисляется первой, а затем окисляются примеси по реакциям:



Из химических уравнений (1-4) видно, что равновесие между Cu_2O и Me , устанавливается концентрацией O_2 и Me .

Для максимально полного удаления примесей необходимо, соблюдение условий: наибольшая упругость диссоциации Cu_2O , при минимальной упругости диссоциации оксида примеси. Упругость диссоциации Cu_2O возрастает с увеличением концентрации O_2 в расплаве меди. Но значительно увеличивать концентрацию кислорода в расплаве меди, не целесообразно так как избыточный Cu_2O в меди не растворяется и образует самостоятельную твердую или жидкую фазу на поверхности расплава (рис. 1).

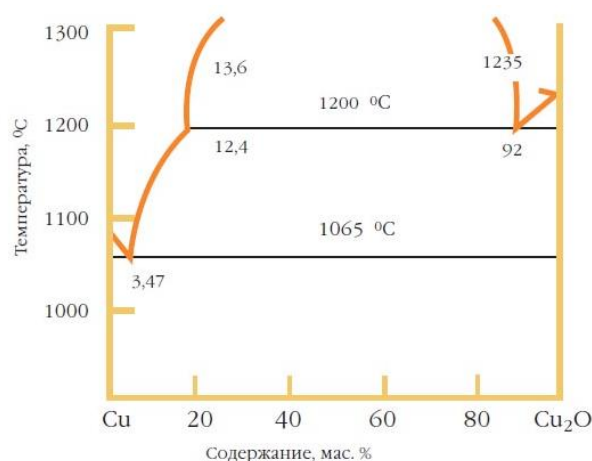
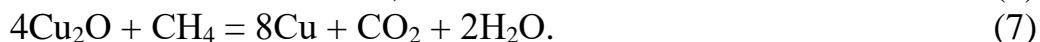
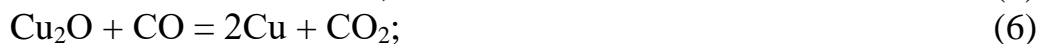


Рис. 1. Диаграмма состояния $\text{Cu} - \text{O}$ (участок $\text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O}$)

– раскисление (восстановление) меди – удаление избыточной концентрации кислорода и газовых пузырьков. Раскисление проводится древесиной, мазутом или природным газом. Восстановительные вещества разлагаются с образованием

водорода, оксида углерода и углеводороды, которые выделяясь, вызывают пере-мешивание расплава и удаление растворенных газов (SO_2 , CO , и др.), а также взаимодействуют с растворенной Cu_2O и восстанавливают ее по реакциям:



Продолжительность периода восстановления меди определяется степенью насыщения кислородом расплава меди на этапе окисления.

Примеры моделирования металлургического процесса огневого рафинирования меди. Рассмотрим методику создания математической модели для решения однокритериальной и многокритериальной задачи огневого рафинирования меди с использованием корреляционно-регрессионного анализа [13-19].

Для решения такого типа задач используем условие о том, что интерполяционная зависимость между переменными построена на основе экспериментальных данных, обрабатываемых методами математической статистики с помощью прикладного пакета *Microsoft Excel*.

Математическая модель для решения однокритериальной задачи. Введем допущения и ограничения:

– шихта состоит из черновой меди заводов – продуцентов ($\text{Ш}_1\text{--}\text{Ш}_n$); температура в печи постоянна; концентрация кислорода в составе шихты не учитывается, зависимость между исследуемыми величинами линейная.

Экспериментальные данные выбраны из базы данных о поплавочном составе шихты.

Из уравнений (1-4) видно, что концентрация необходимого количества кислорода, обеспечивающего достаточно полное окисление примесей черновой меди, зависит от их массы в составе шихты. Используя уравнения (1-4) и метод пассивного эксперимента создадим модель зависимости концентрации кислорода (% по массе) в расплаве у от массы Cu_2O (т) x_1 , (рис. 2):

$$C([\text{O}_2]) = f(\text{Cu}_2\text{O}). \quad (8)$$

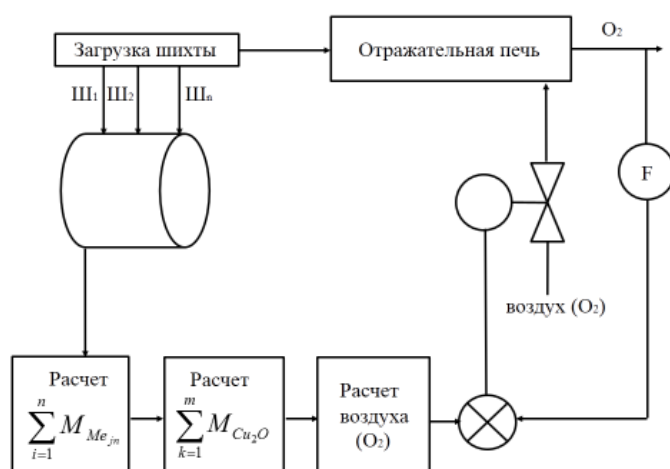


Рис. 2. Схема применения математической модели при решении однокритериальной задачи $C([\text{O}_2]) = f(\text{Cu}_2\text{O})$

Алгоритм составления модели.

1. Для одной плавки шихты черновой меди последовательно рассчитаем суммарную массу примесей в составе шихты ΣM_{mej} ; массу оксида меди (I), необходимую для удаления этих примесей; значение теоретической массы кислорода, необходимого для окисления меди $M_{[O]}$. По величине загрузки печи рассчитаем значение концентрации кислорода, $[O_2]$.

2. Определяем количество плавов (выборка) и для каждой из них проведем расчет по методике п. 1.

3. По выбранному количеству плавов выявляем и описываем закономерность зависимости (8). Исходя из предложенных допущений, представляем данную зависимость уравнением простой линейной регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1. \quad (9)$$

4. Формулируем нулевую гипотезу: параметр x_1 (масса Cu_2O) не оказывают влияния на y (концентрацию кислорода в расплаве).

5. Используя метод наименьших квадратов (МНК), находим значения коэффициентов b_0 и b_1 .

6. Определяем статистическую значимость коэффициентов регрессии.

7. Проверяем адекватность полученного уравнения (9) экспериментальным данным по выбранному критерию.

8. Делаем выводы, готовим предложения и рекомендации.

Для данной модели коэффициент b_1 показывает среднее изменение результативного показателя концентрации кислорода (% по массе) подаваемого в расплав от изменения величины массы Cu_2O (x_1), коэффициент b_0 формально показывает прогнозируемый уровень концентрации кислорода в расплаве. По знаку коэффициента b_1 , можно судить о прямой связи между рассматриваемыми параметрами.

Математическая модель для решения многокритериальной задачи. Анализ физико-химических процессов огневого рафинирования показывает, что концентрация кислорода в расплаве в основном зависит от концентрации примесей, от температуры расплава и гидродинамики продувки жидкой ванны. Используя уравнения (1-4) и метод пассивного эксперимента создадим модель зависимости концентрации кислорода в расплаве y от массы Cu_2O x_1 , температуры расплава x_2 и интенсивности продувки жидкой ванны x_3 (рис. 3):

$$C([O_2]) = f(Cu_2O, T, V). \quad (10)$$

Алгоритм составления модели.

1. Выполняем п.п. 1-2 алгоритма создания модели однокритериальной задачи.

2. Определяем пределы изменений и шаг переменных x_2 и x_3 .

3. По выбранному количеству плавов выявляем и описываем закономерность зависимости (10). Исходя из предложенных допущений, представляем данную зависимость уравнением множественной линейной регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (11)$$

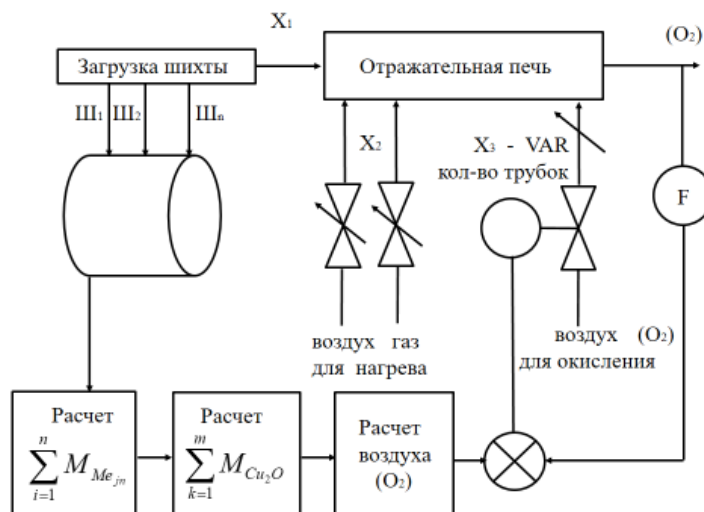


Рис. 3. Схема применения математической модели при решении многокритериальной задачи $C([O_2]) = f(Cu_2O, T, V)$

4. Формулируем нулевую гипотезу: параметры x_1, x_2, x_3 не оказывают влияния на концентрацию кислорода в расплаве.

5. Используя метод наименьших квадратов (МНК), находим значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 .

6. Определяем статистическую значимость коэффициентов регрессии.

7. Проверяем адекватность полученного уравнения (11) экспериментальным данным по выбранному критерию.

8. Делаем выводы, готовим предложения и рекомендации.

Для данной модели трактовка коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 аналогична однокритериальной модели.

В зависимости от задачи исследования существуют особенности расчёта при создании многокритериальной модели. Рассмотрим их методику.

Допустим, необходимо определить совместное влияние параметров x_1, x_2, x_3 на результирующую переменную y .

В этом случае:

– рассчитаем парные коэффициенты корреляции между показателями по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{XY} - \overline{X} \cdot \overline{Y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (12)$$

– находим коэффициент множественной корреляции:

$$R_{1.2.3..n} = \sqrt{1 - \frac{D}{D_{11}}} \quad (13)$$

– проверяем статистическую значимость коэффициента множественной корреляции по критерию Фишера;

– делаем вывод, например, при $F_{набл} > F_{крит}$ полученный коэффициент множественной корреляции является статистически значимым.

Допустим, необходимо определить степень влияния x_1, x_2, x_3 на концентрацию кислорода в расплаве y .

В этом случае:

– используя предыдущий пример по формуле (12) находим парные коэффициенты корреляции между y и x_1 , y и x_2 , y и x_3 ;

– проводим анализ полученных значений и определяем, качество корреляционной связи. Если корреляция между y и одним или несколькими параметрами x_1, x_2, x_3 сильная, то этот параметр оставляем, в противном случае для составления уравнения регрессии параметр не учитываем;

– находим парные коэффициенты корреляции между параметрами x_1, x_2, x_3 ;

– проводим анализ полученных значений и определяем, качество корреляционной связи. Если корреляция между двумя параметрами из (x_1, x_2, x_3) сильная, то нет смысла в уравнение регрессии включать оба, т.к. один из них сильно повторяет динамику другого. В этом случае для уравнения выбираем один, который оказывает большее влияние на y ;

– записываем окончательное уравнение;

– делаем вывод.

Довольно часто, необходимо оценить степень связи концентрации кислорода в расплаве y с одним входным параметром при исключении влияния всех прочих.

В этом случае:

– находим частные коэффициенты корреляции. Это так называемая "чистая" корреляция, например, между качеством черновой меди и составом шихты, исключая влияние на эту взаимосвязь другие параметры. Наиболее удобно поиск осуществлять через линейный коэффициент корреляции по формуле:

$$r_{yx1.x2} = \frac{r_{yx1} - r_{yx2} \cdot r_{x1x2}}{\sqrt{(1 - r_{yx2}^2) \cdot (1 - r_{x1x2}^2)}} \quad (14)$$

– делаем вывод.

Очевидно, что математические модели позволяют обрабатывать большое количество переменных. В связи с этим для расчета значений выбранного количества коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии целесообразно использовать матричный метод:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (15)$$

Рассчитанные коэффициенты подставляем в уравнение (11).

Заключение. В данной работе рассмотрена методика создания математических моделей различного уровня на примере огневого рафинирования черновой меди.

Созданы математические модели, связывающие концентрацию кислорода необходимого для окисления примесей черновой меди с основными показателями металлургического процесса: масса примесей в составе шихты черновой

меди от различных заводов, температура расплава, скорость насыщения ванны кислородом.

Модели позволяют оперативно рассчитывать необходимое количество кислорода, для окисления примесей черновой меди переменного состава с учетом влияния выбранных параметров.

Результаты математического моделирования согласуются с общей теорией огневого рафинирования меди, и могут представлять интерес для управления анодной плавкой и ее прогнозирования.

Список использованных источников

1. Краснов М.П., Киселев А.И., Макаренко Г.И. [и др.]. Вся высшая математика. Том 6. Вариационное исчисление, линейное программирование, вычислительная математика, теория сплайнов. – М.: Либроком, 2013. – 256 с.
2. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применение. – М.: Мир. 1980. – 460 с.
3. Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. М.: Физматлит, 2005. – 128 с.
4. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир. 1998.
5. Лунгу К.Н., Норин В.П., Письменный Д.Т. Сборник задач по высшей математике. М.: Айрис-пресс, 2011.
6. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. Лань, 2011.
7. Соболев А.Б., Рыбалко А.Ф., Математика, курс лекций для технических вузов, книга 2. – М.: изд. центр «Академия», 2010.
8. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016.
9. Davenport W.G., King M., Schlesinger M., Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper, fourth edition. Oxford: Elsevier Sci. Ltd., 2002.
10. Gerlach J., Schneider N., and Wuth W. Oxyden Absorption during Blowing of Molten Cu // Metall. 1972. 25 (11). P. 1246-1251.
11. Frohne O., Rottmann G. and Wuth W., Processing Speeds in the Pyrometallurgical Refining of Cu by the Top-Blowing Process // Metall. 1973. 27(11). P. 1112 – 1117.
12. Zhukov V.P., Mastuyugin S.A., and Khydyakov I.F., Absorption of Oxyden by Molten Copper During Top Blowing With Steam – Air Mixtures // Sov. Non-Ferrous MNet. Res. 1986. 14 (5). p. 371-375.
13. Жуков В.П., Скопов Г.В., Холод С.И. Пирометаллургия меди. Екатеринбург: УрО РАН, 2016.
14. Vanderbei R.J., Linear Programming. Foundations and Extensions. Princeton University, 2001.
15. Venkata Rao R., Kalyankar V. D., Waghmare G. Parameters optimization of selected casting processes using teaching-learning-based optimization algorithm // Applied Mathematical Modelling. 2014. Vol. 38, No. 23. P. 5592-5608.

16. Huijun Feng, Lingen Chen, ZhihuiXie, Zemin Ding, Fengrui Sun. Generalized structural optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate // Energy. 2014. Vol. 66. P. 991-998.

17. Shor Ya. B. Statisticheskie metody analiza i kontrolya kachestva i nadezhnosti [Statistical methods of analysis and quality control and reliability]. – M.: Soviet radio, 1962.

18. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnoctei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. M.: Nauka, 1979.

19. Bitner G. Teoriya veroyatnoctei [Probability Theory]. D: Feniks, 2012.

УДК 669.162.27.003.1

В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

НДТ ПО ОЦЕНКЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Аннотация

В статье предлагается оценивать наилучшие доступные технологии по значениям следующих технологических чисел: топливного, экологического, амортизационного, парникового и их сумм. Все эти числа имеют энергетическую размерность: т условного топлива / единицу продукции, что позволяет их складывать. Топливное технологическое число характеризует энергоёмкость продукции. Технологическое экологическое число переводит плату предприятия за загрязнение окружающей среды в энергетические единицы. Технологическое амортизационное число переводит амортизационные отчисления из рублей в энергетические единицы. Технологическое парниковое число переводит плату предприятия за выбросы парниковых газов в энергетические единицы. Технологические числа имеют сквозной характер – от добычи сырья до получения готовой продукции. Наилучшие доступные технологии характеризуются наименьшей суммой всех технологических чисел.

Ключевые слова: сквозной энерго-экологический анализ, энергоэкологическая энергоёмкость производства металлопродукции, технологическое топливно-экологическо-парниковое число, наилучшие доступные технологии, климатическая нейтральность.

Abstract

In article it is offered to estimate the best available technologies for values of the following technological numbers: fuel, ecological, depreciation, greenhouse and their sums. All these numbers have power dimension: t of conditional fuel / unit of production that allows to put them. The fuel technological number characterizes power consumption of production. The technological ecological number transfers a payment of the enterprise for environmental pollution to power units. The technological depreciation number transfers depreciation charges from rubles to power units. The technological greenhouse number translates a payment of the enterprise for emissions of greenhouse gases in power units. Technological numbers have through character – from extraction of raw materials before receiving finished goods. The best available technologies are characterized by the smallest sum of all technological numbers.